

# MACHINES SYNCHRONES et MOTEURS BRUSHLESS

4ème année AE-SE Année 2017-2018

*Plan :*

## *Chapitre 1 : les machines synchrones*

- I. Généralités sur les machines synchrones*
- II. Machine synchrone en fonctionnement génératrice (alternateur)*
- III. Machine synchrone en fonctionnement moteur*
- IV. Bibliographie*

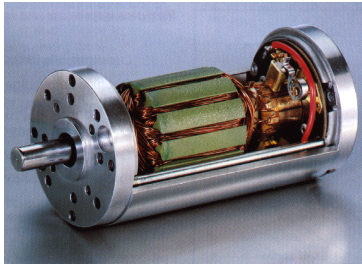
## *Chapitre 2 : les machines brushless*

# Chapitre 1

## Les machines synchrones

## I.1) Généralités sur les machines synchrones

Tour d'horizon des machines électriques



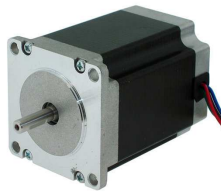
Machines à courant continu (MCC)



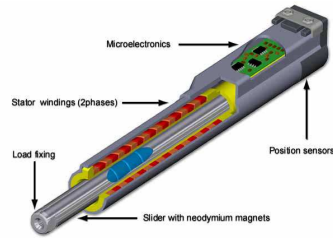
Machines synchrones (MS)



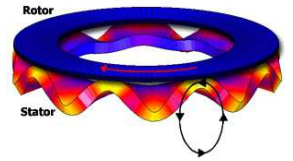
Machines asynchrones (MAS)



Moteurs pas à pas



Moteurs linéaires

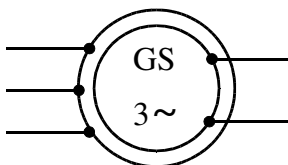


Moteurs piézo-électriques

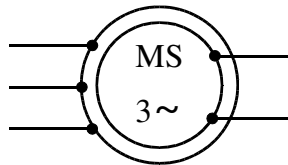
## I.2) Machine synchrone : définition et représentation

Définition : Une machine synchrone est une machine à courant alternatif dans laquelle la fréquence de la tension induite engendrée et la vitesse sont dans un rapport constant.

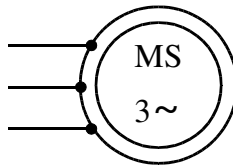
Représentation symbolique :



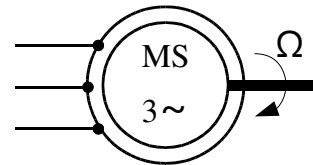
Symbole d'un alternateur triphasé



Symbole d'un moteur synchrone triphasé à inducteur bobiné

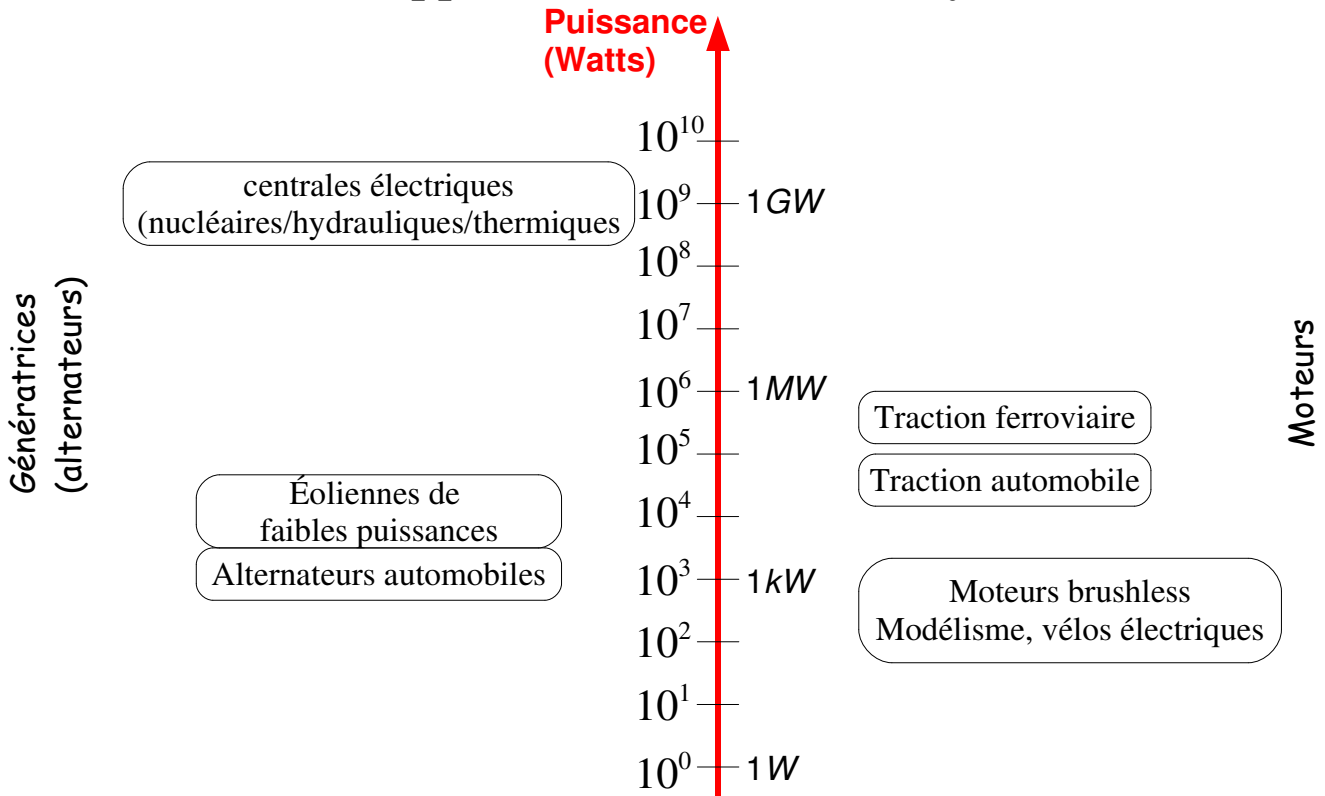


Symbole d'un moteur synchrone triphasé à aimants

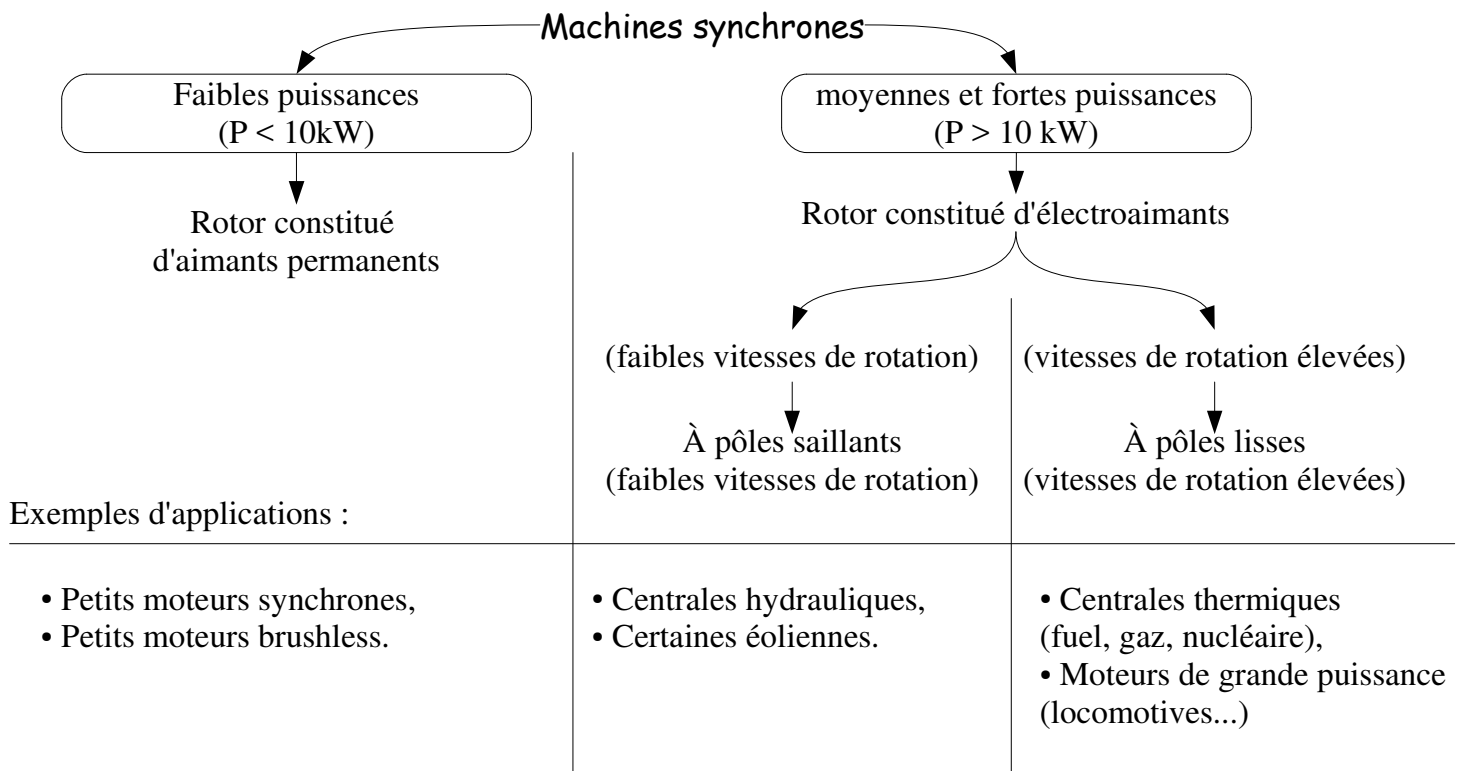


Symbole (non officiel) d'une machine synchrone triphasée

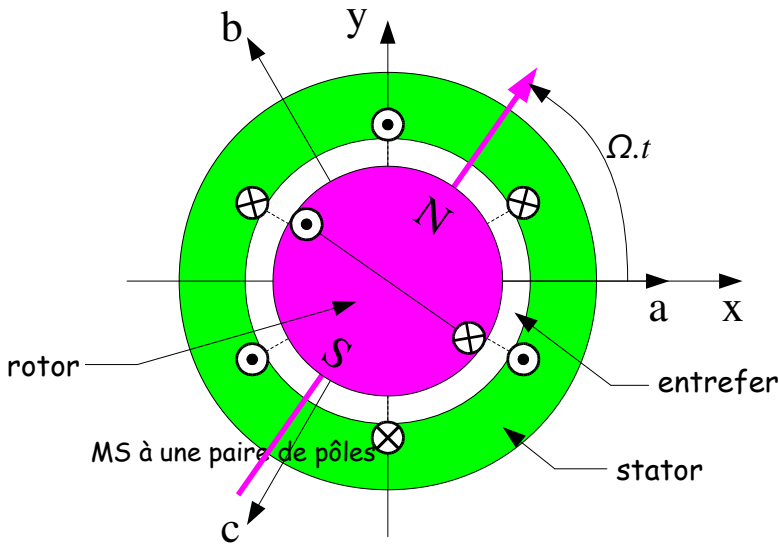
### I.3) Applications des machines synchrones



### I.4) Classification des machines synchrones



## I.5) Constitution des machines synchrones



Les machines synchrones sont constituées de :

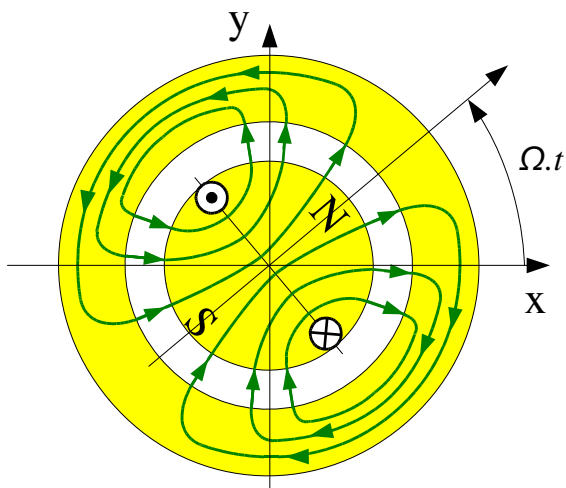
- Un rotor, qui peut être soit à aimants permanents, soit à électroaimants. Le rotor possède  $p$  pôles Nord et  $p$  pôles Sud intercalés.

- Un stator, dont la face interne contient  $3 \cdot p$  bobinages. Chaque bobinage est décalé du suivant d'un angle  $\frac{2\pi}{3p}$

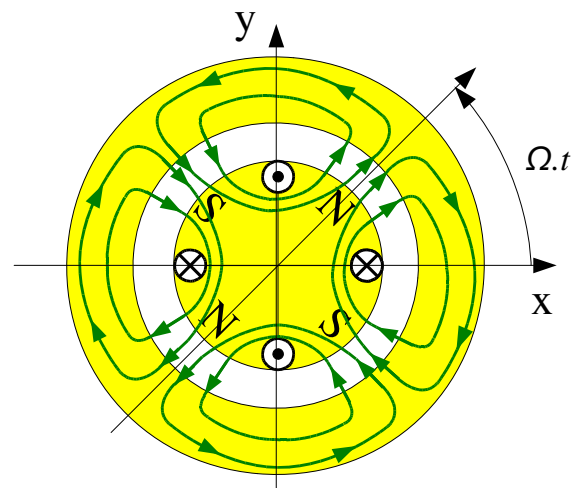
Les machines synchrones sont toujours constituées d'un matériau ferromagnétique, qui sert à canaliser les lignes de champ magnétique.

La zone située entre le stator et le rotor s'appelle l'entrefer. Son épaisseur est la plus faible possible.

## II.1) Machine synchrone en alternateur : principe de fonctionnement



A) Rotor à une paire de pôles



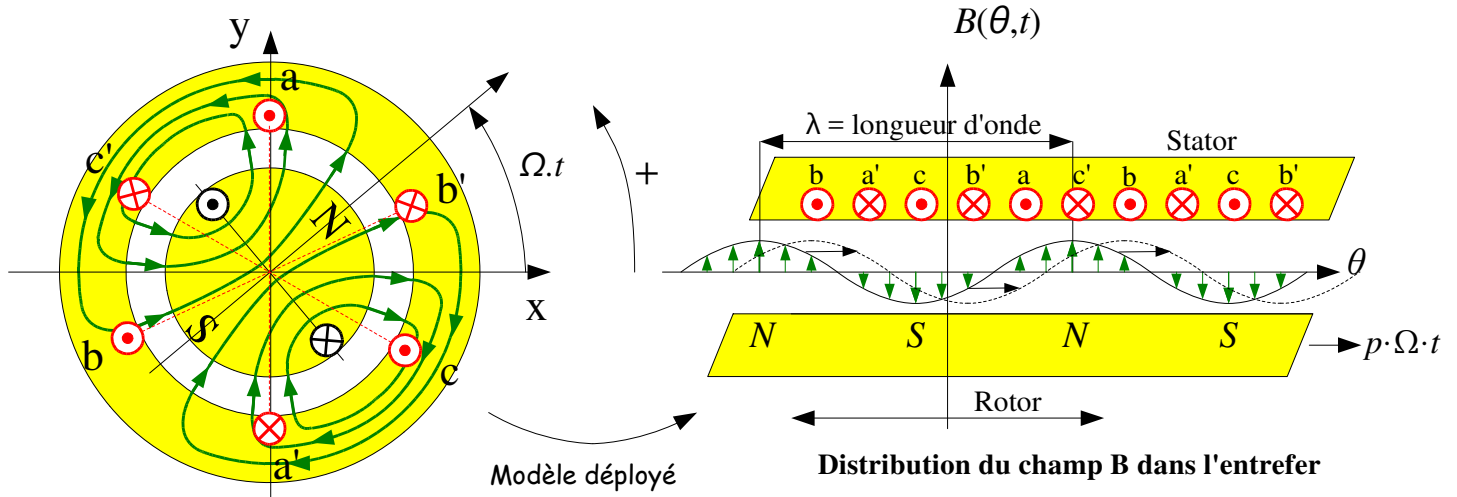
B) Rotor à deux paires de pôles

Le rotor est entraîné à la pulsation mécanique  $\Omega$  (rad.s<sup>-1</sup>). Il crée un champ magnétique tournant, tel que :

- Les lignes de champ sont canalisées par le fer,
- Elles se referment sur elles-mêmes,
- Les lignes de champ sont radiales dans l'entrefer.

Les lignes de champ sont orientées : conventionnellement, elles entrent par le pôle sud et sortent par le pôle nord du rotor.

## II.1) Machine synchrone en alternateur : principe de fonctionnement



- Le rotor est entraîné à la pulsation mécanique  $\Omega$  ( $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ).
- Il crée dans l'entrefer une onde sinusoïdale de champ magnétique tournant, de la forme :

$$B(\theta, t) = B_{max} \cdot \cos(p(\theta - \Omega t))$$

- $p = \text{nb de paires de pôles}$
- $\theta = \text{position angulaire mesurée par rapport à l'axe d'origine de la machine}$

## II.1) Machine synchrone en alternateur : principe de fonctionnement

Relation entre pulsation mécanique et pulsation électrique :

Le champ magnétique créé dans l'entrefer a pour expression :

$$B(\theta, t) = B_{max} \cdot \cos(p(\theta - \Omega t))$$

D'où :

$$B(\theta, t) = B_{max} \cdot \cos(p\theta - \omega t)$$

Ainsi, toutes les grandeurs électriques (champ B, flux, et fém) sont de pulsation  $\omega$  tandis que le rotor est entraîné à la pulsation mécanique  $\Omega$ .

$$\omega = p \Omega \quad \Leftrightarrow \quad \Omega = \frac{\omega}{p}$$

$p = \text{nb de paires de pôles}$

## II.1) Machine synchrone en alternateur : principe de fonctionnement

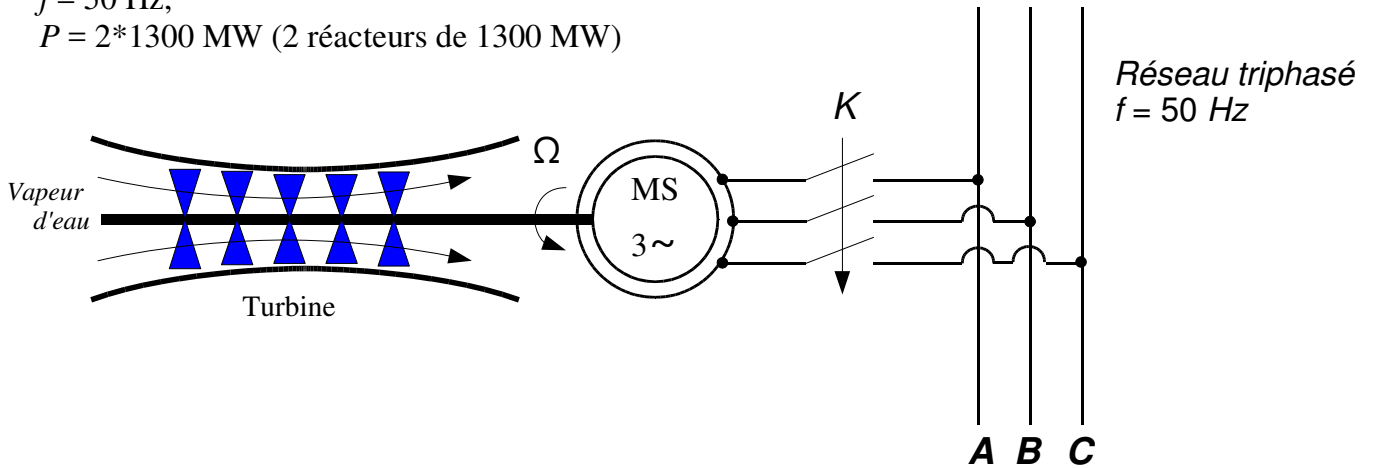
Application : raccordement d'un turbo-alternateur triphasé à un réseau électrique.

Ex : centrale nucléaire de Golfech :

$p = 2$  paires de pôles,

$f = 50$  Hz,

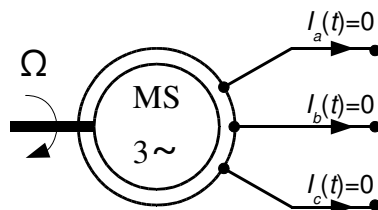
$P = 2 \cdot 1300$  MW (2 réacteurs de 1300 MW)



A quelle vitesse angulaire doit tourner le rotor pour que l'on puisse fermer l'interrupteur  $K$  (vitesse de synchronisme) ? Donner le résultat en tr/min.

## II.2) Machine synchrone en alternateur à vide

Hypothèse de la MS à vide :



La machine synchrone est à vide

$\Leftrightarrow$  les intensités des courants  $I_a(t)$ ,  $I_b(t)$  et  $I_c(t)$  sont nulles.

$\Leftrightarrow$  seul le rotor contribue à la création du champ magnétique  $B(\theta, t)$  dans l'entrefer.

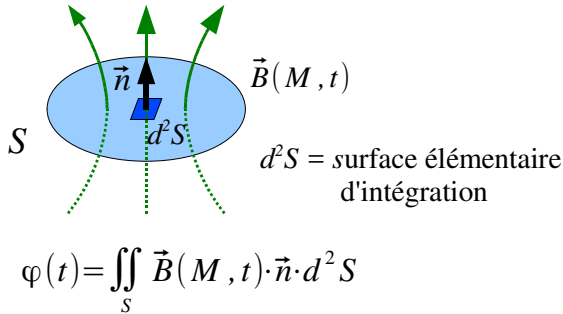
$\Leftrightarrow B(\theta, t) = B_r(\theta, t)$

↑ Champ magnétique rotorique

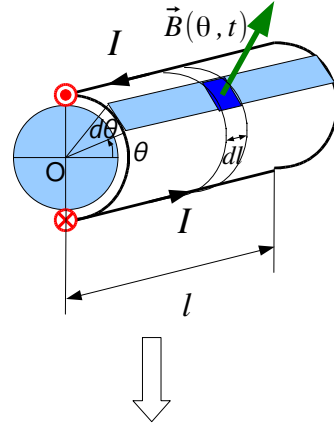
## II.2) Machine synchrone en alternateur à vide

### Calcul du flux embrassé par les enroulements statoriques

Principe général du calcul



Application au cas de la machine synchrone



$d^2S = \text{surface élémentaire d'intégration}$

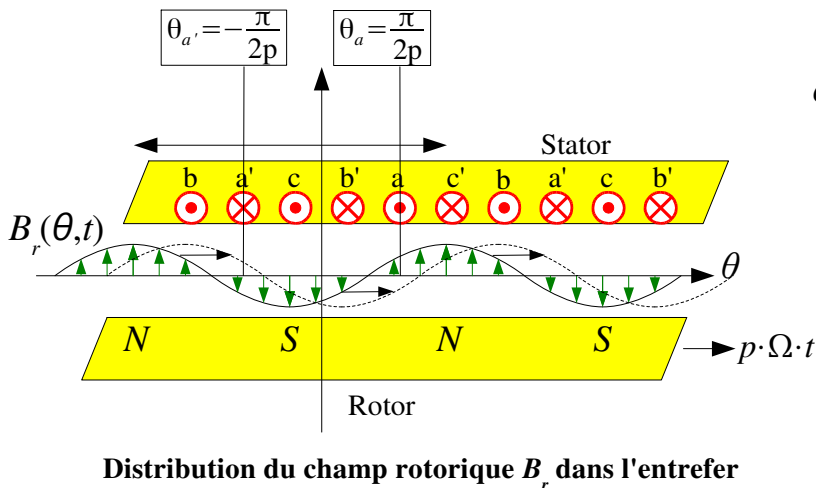
$$d^2S = R \cdot d\theta \cdot dl$$

$$\frac{-\pi}{2p} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2p}$$

On définit une surface d'intégration qui s'appuie sur le contour de la bobine, mais qui épouse la forme de l'entrefer ==> S est une portion de cylindre.

## II.2) Machine synchrone en alternateur à vide

### Calcul du flux embrassé par les enroulements statoriques



$\varphi_{aa'}(t) = \text{flux capté par une spire de la phase } aa'$

$$\varphi_{aa'}(t) = \iint_S B_r(\theta, t) \cdot d^2S$$

$$\varphi_{aa'}(t) = \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} B_{max} \cdot \cos(p(\theta - \Omega t)) \cdot R d\theta \cdot \int_0^l dl$$

## II.2) Machine synchrone en alternateur à vide

### Calcul du flux embrassé par les enroulements statoriques

Le calcul de  $\varphi_{aa'}(t)$  donne le résultat suivant :

$$\varphi_{aa'}(t) = \frac{2 R l B_{max}}{p} \cdot \cos(p \Omega t)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \bullet R = \text{rayon du rotor,} \\ \bullet l = \text{longueur du rotor,} \\ \bullet B_{max} = \text{valeur maximale du champ } B \text{ présent dans l'entrefer,} \\ \bullet \Omega = \text{pulsation de rotation du rotor (en rad.s}^{-1}\text{).} \end{array} \right.$$

⇒ Flux totalisé pour la phase  $aa'$  :

$$\Phi_{aa'}(t) = p \cdot n \cdot K_b \cdot \varphi_{aa'}(t) = n \cdot K_b \cdot 2 R l B_{max} \cdot \cos(p \Omega t)$$

Avec :

- $p$  = nb de paires de pôles,
- $n$  = nb de spires par enroulement,
- $K_b$  = coefficient de bobinage.

## II.2) Machine synchrone en alternateur à vide

### Calcul du flux embrassé par les enroulements statoriques

Il est possible de reproduire le même raisonnement pour les 3 phases ( $aa'$ ,  $bb'$  et  $cc'$ ). Compte tenu du fait que les enroulements sont déphasés de  $2\pi/3$  les uns par rapports aux autres, on aboutit alors au résultat suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{aa'}(t) = \Phi_{max} \cdot \cos(p \Omega t) \\ \Phi_{bb'}(t) = \Phi_{max} \cdot \cos(p \Omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \Phi_{cc'}(t) = \Phi_{max} \cdot \cos(p \Omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{array} \right. \quad \text{Avec : } \Phi_{max} = n \cdot K_b \cdot 2 R l B_{max}$$



## II.2) Machine synchrone en alternateur à vide

### Calcul des forces électromotrices créées par la MS à vide

Loi de Faraday :

$$\left\{ \begin{array}{l} e_{va}(t) = -\frac{d\Phi_{aa'}}{dt}(t) = p \cdot \Omega \cdot \Phi_{max} \cdot \sin(p\Omega t) \quad \rightarrow \text{fém créée à vide aux bornes de la phase } aa'. \\ e_{vb}(t) = -\frac{d\Phi_{bb'}}{dt}(t) = p \cdot \Omega \cdot \Phi_{max} \cdot \sin(p\Omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad \rightarrow \text{fém créée à vide aux bornes de la phase } bb'. \\ e_{vc}(t) = -\frac{d\Phi_{cc'}}{dt}(t) = p \cdot \Omega \cdot \Phi_{max} \cdot \sin(p\Omega t - \frac{4\pi}{3}) \quad \rightarrow \text{fém créée à vide aux bornes de la phase } cc'. \end{array} \right.$$

#### Conclusion :

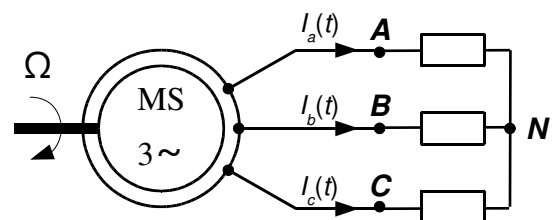
La machine synchrone, lorsqu'elle fonctionne en génératrice à vide, génère un système triphasé équilibré de tensions sinusoïdales :

- de pulsation électrique  $\omega = p\Omega$  ,
- **d'amplitude proportionnelle à  $\omega$ .**

## II.3) Machine synchrone en alternateur en charge

Lorsque la machine synchrone est connectée à une charge triphasée, alors les courants  $I_a(t)$ ,  $I_b(t)$  et  $I_c(t)$  peuvent circuler dans les 3 phases statoriques ( $aa'$ ,  $bb'$  et  $cc'$ ).

⇒ Conséquence : chaque courant statorique génère sa propre contribution au champ  $B(\theta, t)$  résultant dans l'entrefer.



Hypothèse de non saturation :

Le champ  $B(\theta, t)$  créé dans l'entrefer est la superposition des champs suivants :

- $B_r(\theta, t)$  créé par le rotor,
- $B_a(\theta, t)$  créé par la circulation de l'intensité  $I_a(t)$  dans la phase  $aa'$ ,
- $B_b(\theta, t)$  créé par la circulation de l'intensité  $I_b(t)$  dans la phase  $bb'$ ,
- $B_c(\theta, t)$  créé par la circulation de l'intensité  $I_c(t)$  dans la phase  $cc'$ .

Ceci se traduit mathématiquement par l'expression suivante :

$$B(\theta, t) = B_r(\theta, t) + B_a(\theta, t) + B_b(\theta, t) + B_c(\theta, t)$$

## II.3) Machine synchrone en alternateur en charge

### Calcul du flux embrassé par les enroulements statoriques

Dès lors, le calcul des flux se traduit par une équation matricielle faisant intervenir les inductance propres de chaque phase, ainsi que les mutuelles inductances entre phases.

$$\begin{cases}
 \Phi_{aa'}(t) = \Phi_{max} \cdot \cos(p\Omega t) + \overbrace{L_{aa} \cdot I_a(t) + M_{ab} \cdot I_b(t) + M_{ac} \cdot I_c(t)}^{\text{Flux créés par le courant } I_a(t) \text{ qui circule dans la phase } aa'} \\
 \Phi_{bb'}(t) = \Phi_{max} \cdot \cos(p\Omega t - \frac{2\pi}{3}) + M_{ab} \cdot I_a(t) + L_{bb} \cdot I_b(t) + M_{bc} \cdot I_c(t) \\
 \Phi_{cc'}(t) = \Phi_{max} \cdot \cos(p\Omega t - \frac{4\pi}{3}) + \underbrace{M_{ac} \cdot I_a(t) + M_{bc} \cdot I_b(t)}_{\text{Flux créés par le champ rotorique } B_r(\theta, t)} + L_{cc} \cdot I_c(t)
 \end{cases}$$

$L_{kk}$  = inductance propre de la phase  $k$   
 $M_{jk}$  = inductance mutuelle entre la phase  $j$  et la phase  $k$   
 Avec  $j = a, b$  ou  $c$  et  $k = a, b$  ou  $c$ .

Flux créés par le courant  $I_b(t)$  qui circule dans la phase  $bb'$ .

## II.3) Machine synchrone en alternateur en charge

### Calcul du flux embrassé par les enroulements statoriques

Les équations précédentes peuvent sembler compliquées, mais elles se simplifient car :

- D'une part, le problème est invariant lors d'une rotation d'un angle  $2\pi/3$ ,  
 $\Rightarrow L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L$   
 $M_{ab} = M_{bc} = M_{ac} = M$
- D'autre part, la loi des nœuds en N (point neutre) nous donne :  $I_a(t) + I_b(t) + I_c(t) = 0$

Il résulte de tout cela que :

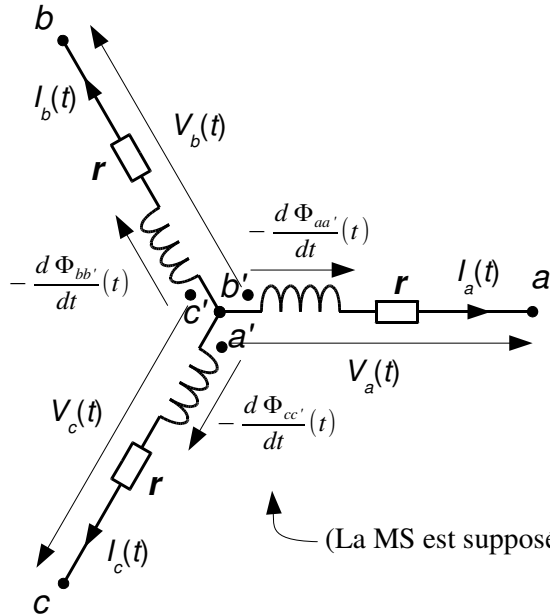
$$\begin{cases}
 \Phi_{aa'}(t) = \Phi_{max} \cdot \cos(p\Omega t) + (L - M) \cdot I_a(t) \\
 \Phi_{bb'}(t) = \Phi_{max} \cdot \cos(p\Omega t - \frac{2\pi}{3}) + (L - M) \cdot I_b(t) \\
 \Phi_{cc'}(t) = \Phi_{max} \cdot \cos(p\Omega t - \frac{4\pi}{3}) + (L - M) \cdot I_c(t)
 \end{cases}$$

$L_{cyc} = L - M$  est appelée *inductance cyclique* de la machine synchrone

## II.3) Machine synchrone en alternateur en charge

### Modèle électrique de la MS en génératrice

En fin de compte, la machine synchrone en génératrice est équivalente au modèle électrique suivant :



$$\begin{cases} V_a(t) = -\frac{d\Phi_{aa'}(t)}{dt} - r I_a(t) \\ V_b(t) = -\frac{d\Phi_{bb'}(t)}{dt} - r I_b(t) \\ V_c(t) = -\frac{d\Phi_{cc'}(t)}{dt} - r I_c(t) \end{cases}$$

$r$  = résistance de chaque enroulement statorique

(La MS est supposée connectée en étoile :  $a' = b' = c'$ )

## II.3) Machine synchrone en alternateur en charge

### Modèle électrique de la MS en génératrice

D'après les expressions des flux (transparent 20) :

$$\begin{cases} V_a(t) = -\frac{d\Phi_{aa'}(t)}{dt} - r I_a(t) = p\Omega\Phi_{max}\sin(p\Omega t) - L_{cyc}\frac{dI_a(t)}{dt} - r I_a(t) \\ V_b(t) = -\frac{d\Phi_{bb'}(t)}{dt} - r I_b(t) = p\Omega\Phi_{max}\sin(p\Omega t - \frac{2\pi}{3}) - L_{cyc}\frac{dI_b(t)}{dt} - r I_b(t) \\ V_c(t) = -\frac{d\Phi_{cc'}(t)}{dt} - r I_c(t) = p\Omega\Phi_{max}\sin(p\Omega t - \frac{2\pi}{3}) - L_{cyc}\frac{dI_c(t)}{dt} - r I_c(t) \end{cases}$$

$e_{va}(t), e_{vb}(t), e_{vc}(t)$   
= forces électromotrices à vide  
= fém dues au champ rotorique  $B_r(\theta, t)$

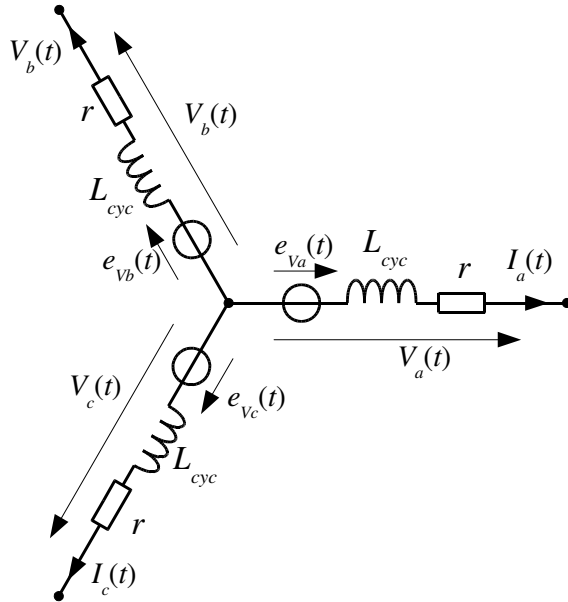
Contribution du champ statorique  
 $B_s(\theta, t) = B_a(\theta, t) + B_b(\theta, t) + B_c(\theta, t)$

Chute de tension due à la résistance  
des enroulements statoriques  $aa', bb'$  et  $cc'$ .

## II.3) Machine synchrone en alternateur en charge

### Modèle de Behn-Eschenbourg de la MS en génératrice

Finalement, la MS est équivalente à une source ( $r, L, e(t)$ ) triphasée.



- $e_{va}(t), e_{vb}(t), e_{vc}(t)$  sont les forces électromotrices (observées lorsque la MS est à vide),
- $r$  = résistance des enroulements rotoriques,
- $L_{cyc} = L - M$  est l'inductance cyclique de la machine

Le Modèle de Behn-Eschenbourg est valable :

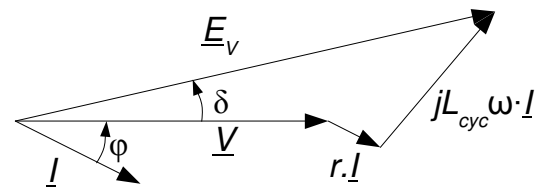
- En l'absence de saturation magnétique du matériau (hypothèse de linéarité),
- Dans le cas d'une machine synchrone à pôles lisses (hypothèse d'un entrefer d'épaisseur constante).

## II.3) Machine synchrone en alternateur en charge

### Diagramme de Behn-Eschenbourg

Les équations du modèle de Behn-Eschenbourg peuvent se traduire graphiquement sous la forme d'un diagramme de Fresnel monophasé équivalent :

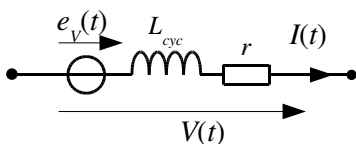
$$\left\{ \begin{aligned} V_a(t) &= e_{va}(t) - L_{cyc} \cdot \frac{dI_a(t)}{dt} - r I_a(t) \\ V_b(t) &= e_{vb}(t) - L_{cyc} \cdot \frac{dI_b(t)}{dt} - r I_b(t) \\ V_c(t) &= e_{vc}(t) - L_{cyc} \cdot \frac{dI_c(t)}{dt} - r I_c(t) \end{aligned} \right. \iff$$



$$\underline{V} = \underline{E}_v - jL_{cyc} \omega \cdot \underline{I} - r \cdot \underline{I}$$

#### Diagramme de Behn-Eschenbourg en convention génératrice

- $\delta$  = angle interne de la machine,
- $\phi$  = déphasage du courant par rapport à la tension

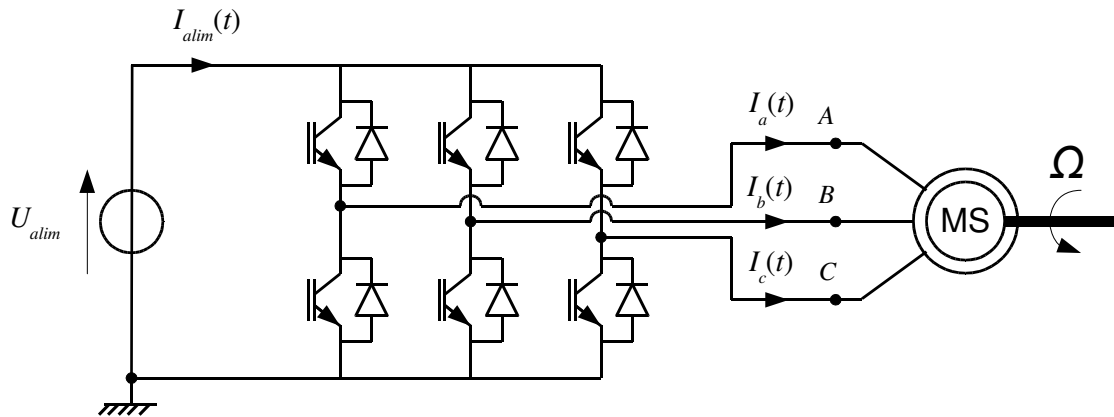


### III) Machine synchrone en moteur

#### Principe de fonctionnement

La solution la plus courante : alimenter le moteur synchrone par un onduleur triphasé fonctionnant en PWM

⇒ L'onduleur délivre un système triphasé des tensions quasi-sinusoïdales  $V_a(t), V_b(t), V_c(t)$  (hypothèse du premier harmonique).



⇒ Le moteur synchrone absorbe les courants  $I_a(t), I_b(t), I_c(t)$  quasi sinusoïdaux.

### III) Machine synchrone en moteur

#### Principe de fonctionnement

Le moteur synchrone absorbe les courants  $I_a(t), I_b(t), I_c(t)$  quasi sinusoïdaux.

**Théorème de Ferraris :**

Trois bobinages décalés de  $2\pi/3$ , alimentés par des courants sinusoïdaux triphasés équilibrés de pulsation  $\omega$  permettent de créer un champ magnétique tournant à la vitesse angulaire  $\omega$ . [3]

⇒ Les courants statoriques créent dans l'entrefer une onde sinusoïdale de champ magnétique tournant, de la forme :

$$B_s(\theta, t) = B_{sM} \cdot \cos(\omega t - p\theta)$$

Cette onde de champ tournant créée par le stator interagit avec les pôles nord et sud du rotor.

⇒ Il résulte de cette interaction un couple de forces qui s'exerce sur le rotor.

### III) Machine synchrone en moteur

#### Principe de fonctionnement

**Cas n°1** : si le rotor est initialement à l'arrêt.

Dans ce cas, le couple résultant de l'interaction entre le champ statorique et le champ rotorique possède une valeur moyenne nulle.

⇒ Le moteur synchrone ne démarre pas spontanément.

**Cas n°2** : si le rotor tourne à la vitesse de synchronisme  $\Omega = \omega/p$ .

Dans ce cas, le couple résultant de l'interaction entre le champ statorique et le champ rotorique possède une valeur moyenne non nulle.

⇒ Le moteur synchrone est entraîné à la vitesse angulaire  $\Omega = \frac{\omega}{p}$

### III) Machine synchrone en moteur

#### Expression du couple moteur

- Les courants statoriques  $I_a(t), I_b(t), I_c(t)$  créent dans l'entrefer de la machine le champ statorique  $B_s(\theta, t)$  tournant à la pulsation  $\omega$  :

$$B_s(\theta, t) = B_{sM} \cdot \cos(\omega t - p\theta)$$

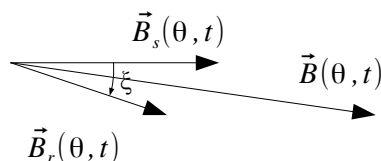
- Le rotor, dans sa rotation de pulsation  $\Omega = \omega/p$ , crée lui aussi un champ magnétique tournant à la pulsation  $\omega$  :

$$B_r(\theta, t) = B_{sM} \cdot \cos(\omega t - p\theta - \xi)$$

$\xi$  (prononcer « xi ») désigne le déphasage du champ rotorique par rapport au champ statorique.

- Le champ résultant  $B(\theta, t)$  est la somme vectorielle des champs statorique et rotorique.

$$B(\theta, t) = B_s(\theta, t) + B_r(\theta, t)$$



### III) Machine synchrone en moteur

#### Expression du couple moteur

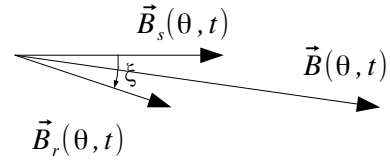
A partir de l'expression de l'énergie magnétique stockée dans l'entrefer, il est possible de démontrer que le couple moteur s'exprime de la manière suivante :

$$\Gamma = \frac{\pi l e R}{\mu_0} B_{sM} B_{rM} \cdot \sin(\xi)$$

(source : [621.46] MAY, p.89 et p.97)

Avec :

- $l$  = longueur du rotor,
- $R$  = rayon du rotor
- $e$  = épaisseur de l'entrefer,
- $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  : perméabilité magnétique du vide
- $B_{sM}$  : amplitude maximale du champ statorique,
- $B_{rM}$  : amplitude maximale du champ rotorique,
- $\xi$  : déphasage du champ rotorique par rapport au champ statorique.



### III) Machine synchrone en moteur

#### Expression du couple moteur

$$\Gamma = \frac{\pi l e R}{\mu_0} B_{sM} B_{rM} \cdot \sin(\xi)$$



Lorsque  $\xi = \pi/2$  :

$$\Gamma_{max} = \frac{\pi l e R}{\mu_0} B_{sM} B_{rM}$$

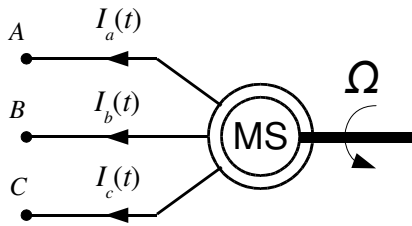
Conséquences :

- 1) Le moteur synchrone fournit son couple maximum lorsque le déphasage du champ rotorique par rapport au champ statorique vaut  $\pi/2$ .
- 2) Si le couple résistant est supérieur au couple maximum  $\Gamma_{max}$ , alors le moteur synchrone décroche : le rotor s'arrête net, tandis que le champ statorique continue de tourner à la vitesse angulaire  $\Omega = \omega/p$ .

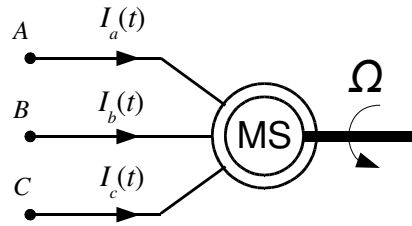
### III) Machine synchrone en moteur

#### Modèle électrique du moteur synchrone

La machine synchrone, lorsqu'elle fonctionne en moteur, obéit aux mêmes équations qu'en génératrice. La seule différence provient du sens conventionnel de fléchage des courant statoriques  $I_a(t), I_b(t), I_c(t)$ .



Convention génératrice :  
 $I_a(t), I_b(t), I_c(t)$  sortants.



Convention moteur:  
 $I_a(t), I_b(t), I_c(t)$  entrants.

### III) Machine synchrone en moteur

#### Modèle électrique du moteur synchrone

De la même manière qu'en mode génératrice, les champs statorique et rotorique s'additionnent. Comme seul le fléchage des courants statoriques change, il en résulte juste un changement de signe dans l'expression des flux totalisés.

	Flux créés par le courant $I_a(t)$ qui circule dans la phase $aa'$ .	Flux créés par le courant $I_c(t)$ qui circule dans la phase $cc'$ .
{	$\Phi_{aa'}(t) = \Phi_{max} \cdot \cos(p\Omega t) - \overbrace{L_{aa} \cdot I_a(t) + M_{ab} \cdot I_b(t) + M_{ac} \cdot I_c(t)}$	
	$\Phi_{bb'}(t) = \Phi_{max} \cdot \cos\left(p\Omega t - \frac{2\pi}{3}\right) - M_{ab} \cdot I_a(t) - L_{bb} \cdot I_b(t) - M_{bc} \cdot I_c(t)$	
	$\Phi_{cc'}(t) = \Phi_{max} \cdot \cos\left(p\Omega t - \frac{4\pi}{3}\right) - M_{ac} \cdot I_a(t) - M_{bc} \cdot I_b(t) - L_{cc} \cdot I_c(t)$	
Flux créés par le champ rotorique $B_r(\theta, t)$	Flux créés par le courant $I_b(t)$ qui circule dans la phase $bb'$ .	

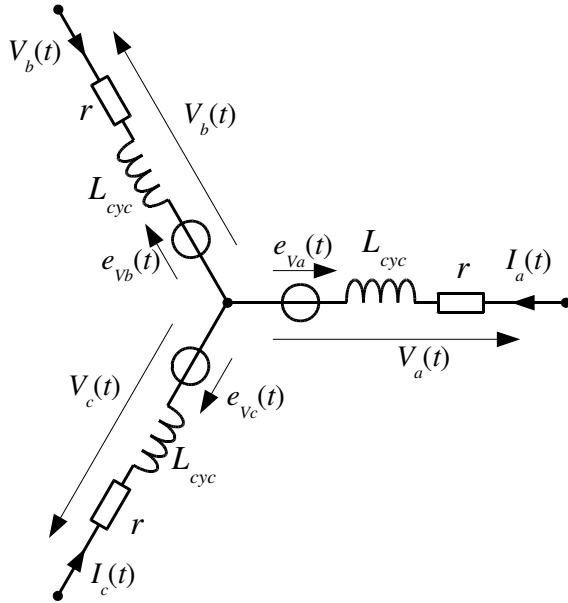
$L_{kk}$  = inductance propre de la phase  $k$   
 $M_{jk}$  = inductance mutuelle entre la phase  $j$  et la phase  $k$   
 Avec  $j = a, b$  ou  $c$  et  $k = a, b$  ou  $c$ .



### III) Machine synchrone en moteur

#### Modèle électrique du moteur synchrone

Le reste du raisonnement reste inchangé. Il permet d'aboutir au modèle de Behn-Eschenbourg en convention moteur :



- $e_{va}(t), e_{vb}(t), e_{vc}(t)$  sont les forces électromotrices (observées lorsque la MS est à vide),
- $r$  = résistance des enroulements rotoriques,
- $L_{cyc} = L - M$  est l'inductance cyclique de la machine

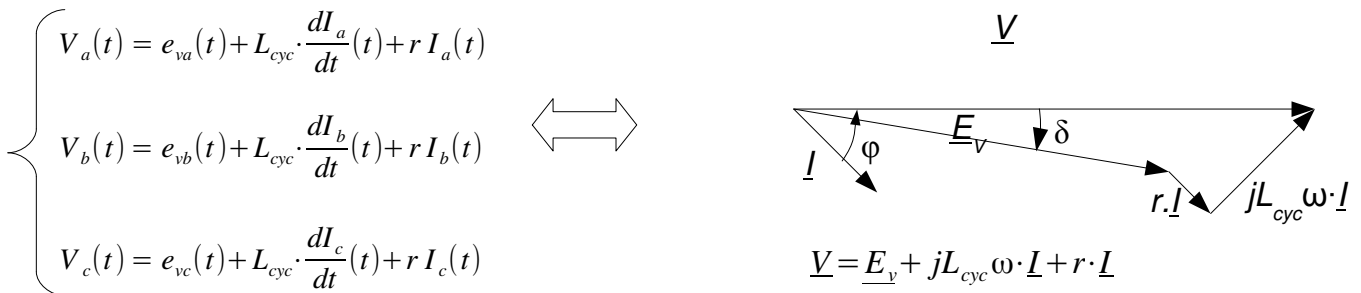
Le Modèle de Behn-Eschenbourg est valable :

- En l'absence de saturation magnétique du matériau (hypothèse de linéarité),
- Dans le cas d'une machine synchrone à pôles lisses (hypothèse d'un entrefer d'épaisseur constante).

### III) Machine synchrone en moteur

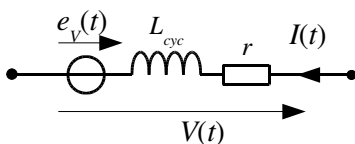
#### Diagramme de Behn-Eschenbourg

Les équations du modèle de Behn-Eschenbourg peuvent se traduire graphiquement sous la forme d'un diagramme de Fresnel monophasé équivalent :



#### Diagramme de Behn-Eschenbourg en convention moteur

- $\delta$  = angle interne de la machine,
- $\phi$  = déphasage du courant par rapport à la tension



## IV) Bibliographie

### Sites internet :

- [1] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine\\_électrique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_électrique)
- [2] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine\\_synchrone](https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_synchrone)
- [3] <http://www.etasf.fr/index.php?/accueil/sommairesec/machineSynchrone>
- [4] [http://www.lerepairedessciences.fr/sciences/agregation\\_fichiers/Electronique/Cours\\_Machines\\_alternatives.pdf](http://www.lerepairedessciences.fr/sciences/agregation_fichiers/Electronique/Cours_Machines_alternatives.pdf)
- [5] <https://www.edf.fr/groupe-edf/producteur-industriel/carte-des-implantations/centrale-nucleaire-de-golfech/presentation>
- [6] [http://sciences-physiques.ac-dijon.fr/documents/lycee/phys\\_app/traction\\_fer/traction\\_fer.pdf](http://sciences-physiques.ac-dijon.fr/documents/lycee/phys_app/traction_fer/traction_fer.pdf) (document sur la traction ferroviaire)

### Ouvrages présents à Bib'Insa :

- [621.46 MAY] « Moteurs électriques industriels », (P. Mayé) 2ème édition, éditions Dunod, 2011.
- [621.3 PAL] « Précis d'électrotechnique », (Ch. Palermo) éditions Dunod, 2012.
- [621.3 SEG] « Électrotechnique Industrielle » (G. Séguier, F. Notelet) 3ème édition, éditions Tech&Doc, 2006.

### Autres ouvrages :

- Cours électrotechnique 2ème année École Centrale de Lille (année 1995-1996) (C. Rombaut, B. Semail)